

ESTIMASI POLA DISPERSI DEBU, SO₂ DAN NO_x DARI INDUSTRI SEMEN MENGGUNAKAN MODEL GAUSS YANG DIINTEGRASI DENGAN SCREEN3

Estimating Dust, SO₂ and NO_x Dispersion from Cement Industry Using Gaussian Model that Integrated with Screen3

Ni Wayan Srimani Puspa Dewi^a, Tania June^b, Mohammad Yani^c, Mujito^d

^aProgram Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680 – srimanipuspadewi@gmail.com

^bDepartemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor, 16680

^cDepartemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor, 16680

^dDepartemen Lingkungan, PT Holcim Indonesia, Tbk, Bogor

Abstract. Industrial activities are sources of air pollution. Pollutants dispersion in air influenced by meteorological condition, such as wind speed, wind direction, air temperature, air turbulence and atmospheric stability. Air quality monitoring is important in controlling the worst condition of pollutants concentration. Air quality monitoring is not easy to do, because it is time consuming, costly and need technology, so that air quality model is developed as an alternative air quality monitoring. This research used gaussian model, a model for predicting pollutant concentrations in downwind area. This model is applied in cement industry, focusing on major pollutants of the cement industry. Sources of pollutants consist of dust, SO₂ and NO_x. The modeling results showed maximum ground level concentration of dust, SO₂ and NO_x occur at night (7-10 PM). The maximum ground level concentration of dust, SO₂ and NO_x at night respectively were 13.16 µg / Nm³, 32.69 µg / Nm³, 100.21 µg / Nm³ (N1 stack) and 14.65 µg / Nm³, 36.65 µg / Nm³, 128.10 µg / Nm³ (N2 stack) based from downwind scenarios at night when atmospheric condition was stable. The distance where the maximum ground level concentration occurred has a strong correlation with wind speed ($-0.82 \leq r \leq -1$). Based on gaussian model output, air quality monitoring should be executed at night time (stable atmospheric condition) and located at ground level where maximum concentration occurred. Increasing 50m of stack can decrease 57% pollutant concentrations in stable condition.

Keywords: Air quality monitoring, dispersion, gaussian model, pollutants concentration

(Diterima: 08-06-2017; Disetujui: 26-10-2017)

1. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dari komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga mutu udara turun sampai pada tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (PP No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara). Salah satu sektor yang melepaskan polutan ke udara adalah aktivitas sektor industri. Pada triwulan ke-III tahun 2015, pertumbuhan industri pengolahan non-migas di Indonesia mengalami pertumbuhan sebesar 5.21% yaitu lebih tinggi dibandingkan dengan pertumbuhan ekonomi periode serupa di tahun 2014 sebesar 4.73% (Kemenperin, 2016). Pertumbuhan sektor industri ini tentu mengakibatkan penambahan emisi pencemar ke udara, sehingga berpotensi mempengaruhi konsentrasi polutan pada udara ambien. Polutan yang diemisikan oleh industri akan mengalami penyebaran di

atmosfer yang dipengaruhi oleh dinamika atmosfer seperti kecepatan dan arah angin, turbulensi, suhu udara dan kestabilan atmosfer. Hal ini akan mengakibatkan kontaminasi udara ambien di wilayah sekitar pusat pencemar yang luas penyebarannya tergantung dari kondisi atmosfer saat itu sehingga perlu dilakukan pemantauan kualitas udara yang efektif dan representatif. Berdasarkan KLHK (2014), pada tahun 2014 pengukuran kualitas udara di Indonesia hanya dua kali per tahun karena dianggap sudah mewakili kualitas udara tahunan untuk masing-masing parameter.

Kualitas udara harus terus dipantau secara intensif, namun pemantauan kualitas udara tidak mudah untuk dilakukan karena memerlukan biaya, waktu, tenaga dan teknologi, sehingga diperlukan sebuah alternatif untuk upaya pemantauan kualitas udara yang lebih efektif serta representatif. Salah satu alternatif pemantauan kualitas udara adalah menggunakan pemodelan kualitas udara, yaitu model dispersi Gauss yang diaplikasikan untuk

menduga pencemaran udara pada sumber emisi dari suatu sumber pencemar seperti industri. Rahmawati (2003) menyatakan bahwa model Gauss bisa digunakan untuk menduga dispersi polutan dari satu sumber emisi atau beberapa sumber sekaligus dengan memperhitungkan faktor internal serta faktor eksternal seperti kondisi meteorologi, topografi dan bangunan. Ruhiat *et al.* (2008) mengintegrasikan model dispersi Gauss dengan program *Screen3* yang merupakan model US-EPA dari *Environmental Protection Agency*, Amerika Serikat. Hasil prediksi kondisi *plume rise* (kepuhan) dapat dimanfaatkan perusahaan untuk mengelola waktu produksi serta kapasitas produksi yang tepat sehingga kualitas lingkungan tetap terjaga dengan baik. Manfaat lain dari model dispersi Gauss ini adalah perusahaan dapat melakukan pemantauan kualitas udara yang efektif dan representatif secara *real time*.

Shaohui *et al.* (2015) menyatakan bahwa jenis zat pencemar yang biasanya diemisikan oleh industri semen adalah PM (*particulate matter*), SO₂, dan NO_x. Lokasi penelitian ini di industri semen sehingga penelitian ini berfokus pada tiga zat pencemar, yaitu debu (TSP), SO₂, dan NO_x. Spijkerboer *et al.* (2002), menggunakan *Gaussian Plume Model* untuk memprediksikan penyebaran spora pada tanaman kentang. Berdasarkan hasil validasi yang dilakukan oleh peneliti, diperoleh nilai *r* (korelasi) antara pengukuran langsung dengan output model sebesar 80%. Gibson (2013) juga menggunakan model dispersi Gauss yang diintegrasikan dengan model AERMOD untuk menghitung konsentrasi polutan jenis PM_{2.5}, NO_x, dan SO₂ dari sumber titik dan sumber garis di Nova Scotia, Canada.

Apiratikul (2015) menggunakan model dispersi Gauss untuk memprediksi jarak pada arah penyebaran polutan (Xmax) untuk menentukan konsentrasi maksimum polutan di permukaan (*Ground Level Maximum Concentration*) yang disingkat dengan GLMC. Memprediksi GLMC menjadi sesuatu yang penting untuk mengetahui proses dan tempat dampak terburuk dari suatu pencemar dari cerobong asap. Tujuan umum dalam penelitian ini adalah menganalisis kehandalan model Dispersi Gauss sebagai alternatif dalam upaya pemantauan kualitas udara. Tujuan khusus dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pola dispersi debu, SO₂, dan NO_x di udara dengan menggunakan Model Dispersi Gauss.
2. Merumuskan rekomendasi pemantauan dan pengendalian pencemaran udara berdasarkan output Model Dispersi Gauss.

2. Metode

2.1. Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan dari September 2016 – Mei 2017 dengan lokasi penelitian di industri semen di Bogor

dengan koordinat geografi 6°27.456'' LU, 106°55.930'BT.

2.2. Bahan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data meteorologi dan emisi periode Februari – Juli 2016 dengan data per-jam. Data meteorologi dalam penelitian ini bersumber dari industri semen dan Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Kelas I, Dramaga, Bogor serta data emisi diperoleh dari industri semen. Data yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter yang digunakan dalam penelitian

No	Parameter	Satuan
1	Suhu udara ambien	°C
2	Kecepatan angin	m/s
3	Keawanan	-
4	Radiasi matahari	W/m ²
5	Tinggi cerobong	meter
6	Diameter cerobong	meter
7	Suhu polutan keluar dari cerobong	°C
8	Konsentrasi polutan emisi	mg/Nm ³
9	Debit emisi polutan	Nm ³ /menit
10	Peta kabupaten Bogor	-
11	Batas administrasi kabupaten Bogor	-
12	Konsentrasi udara ambien	µg/Nm ³
13	Arah angin	derajat
14	Koordinat cerobong	derajat

2.3. Analisis Data

a. Pola Dispersi dan Konsentrasi Debu, SO₂ dan NO_x

Perhitungan konsentrasi polutan menggunakan persamaan Gaussian sebagai berikut (Arya, 1999):

$$c(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

Untuk perhitungan konsentrasi permukaan (*ground level concentration*) saat $z = 0$ (permukaan tanah) adalah:

$$c(x; H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

Keterangan:

- $c(x; H)$: Konsentrasi polutan di permukaan (g/m³)
- Q : Laju Emisi *steady state* (g/s)
- σ_y : Parameter dispersi kepulan pada arah lateral (m)
- σ_z : Parameter dispersi kepulan pada arah vertikal (m)
- u : Kecepatan angin rata-rata pada sepanjang cerobong (m/s)
- x : Arah Penyebaran Polutan (m)
- y : Jarak Horizontal dari titik tengah cerobong
- z : Tinggi Reseptor dari dasar cerobong (m)
- H : Tinggi Efektif Cerobong (m)

Model Gauss hanya memperhitungkan pencemar yang berasal dari sumber emisi, yaitu cerobong industri semen dalam penelitian ini dan tidak mempertimbangkan emisi lain seperti kendaraan bermotor, debu di jalan serta industri lain di sekitar industri yang bukan merupakan obyek penelitian.

Penentuan *mixing height* (lapisan pencampuran) ditentukan dengan menggunakan persamaan (Arya 1999):

$$h = 0.3 \frac{u_*}{|f|} \quad (3)$$

$$u_* = 0.1u_{10} \quad (4)$$

Keterangan:

h : Ketinggian lapisan percampuran (m)

u_* : Kecepatan angin friksi (m/s)

f : Parameter *coriolis* (9.374×10^{-5} pada 40°)

u₁₀ : Kecepatan angin pada ketinggian alat 10 meter

Pendugaan kecepatan angin pada ketinggian z (m) menggunakan persamaan ketinggian (Seinfeld dan Pandis, 2006)

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p \quad (5)$$

Keterangan:

u_2 : Kecepatan angin rata-rata pada ketinggian z (m)

u_1 : Kecepatan angin rata-rata pada ketinggian alat
(m)

z_2 : Ketinggian pada u_2 (m)

z_1 : Ketinggian pada u_1 (m)

p : Konstanta yang bergantung dari kondisi stabilitas atmosfer dan kekasapan permukaan

Nilai “p” yang merupakan parameter stabilitas atmosfer ditampilkan pada Tabel 2 yang dibedakan menjadi enam kategori. Penentuan stabilitas atmosfer menggunakan klasifikasi dari Pasquill’s tahun 1961 yang dimodifikasi oleh Turner pada tahun 1970 (Arya 1999) ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 2. Nilai p pada wilayah perkotaan

Kelas Stabilitas	Nilai p
A	0.15
B	0.15
C	0.20
D	0.25
E	0.40
F	0.60

Sumber: EPA (1995)

Tabel 3. Klasifikasi stabilitas atmosfer berdasarkan klasifikasi Pasquill's

Kecepatan Angin Permukaan (m/s) (Ketinggian 10 m)	Siang Hari					Malam Hari
	Radiasi Matahari yang Masuk			Keawanan		
	Kuat	Menengah	Lemah	Berawan (>= 4/8)	Cerah (<=3/8)	
< 2	A	A-B	B	E	F	
2-3	A-B	B	C	E	F	
3-5	B	B-C	C	D	E	
5-6	C	C-D	D	D	D	
>6	C	D	D	D	D	

Keterangan:

A : Sangat Tidak Stabil C : Sedikit Tidak Stabil E : Sedikit Stabil

B : Tidak Stabil D : Netral F : Stabil

Menengah

Laju emisi dihitung dengan menggunakan persamaan 6 dan 7 (EPA, 1995):

$$Q = C \times D \quad (6)$$

$$D = A \times V \quad (7)$$

Keterangan :

Q : Laju emisi ($\mu\text{g/s}$)

C : Konsentrasi polutan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

D : Debit gas buang (m^3/s)

A : Luas penampang cerobong (m^2)

V : Kecepatan polutan keluar dari cerobong (m/s)

a. *Penentuan Jarak dan Konsentrasi Maksimum*

Penentuan jarak maksimum pada penelitian ini menggunakan *software Screen View* yang dikelaskan berdasarkan kecepatan angin dan stabilitas atmosfer yang merupakan *tools* untuk menjalankan model *Screen3* yang dikembangkan oleh US-EPA. Output X_{max} (jarak maksimum) dari *Screen View* akan dijadikan input untuk menentukan C_{max} (konsentrasi maksimum permukaan) dalam metode Brigg's untuk polutan debu, SO_2 dan NO_x

Tabel 4. formula penentuan parameter dispersi berdasarkan persamaan Brigg's $\sigma_y(x)$ dan $\sigma_z(x)$ ($10^2 < x < 10^4$)

Kondisi Stabilitas	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
Open field conditions		
A	$0.22 \times (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.20 x$
B	$0.16 \times (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.12 x$
C	$0.11 \times (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.08 \times (1 + 0.0002 x)^{-1/2}$
D	$0.08 \times (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.06 \times (1 + 0.0015 x)^{-1/2}$
E	$0.06 \times (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.03 \times (1 + 0.0003 x)^{-1/2}$
F	$0.04 \times (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$	$0.016 \times (1 + 0.0003 x)^{-1/2}$
Urban conditions		
A-B	$0.32 \times (1 + 0.0004 x)^{-1/2}$	$0.24 \times (1 + 0.001 x)^{-1/2}$
C	$0.22 \times (1 + 0.0004 x)^{-1/2}$	$0.20 x$
D	$0.16 \times (1 + 0.0004 x)^{-1/2}$	$0.14 \times (1 + 0.0003 x)^{-1/2}$
E-F	$0.11 \times (1 + 0.0004 x)^{-1/2}$	$0.08 \times (1 + 0.00015 x)^{-1/2}$

Sumber : Lazaridis (2011)

b. Pemetaan Pola Dispersi dan Konsentrasi Debu (TSP), SO₂ dan NO_x

Pemetaan wilayah penyebaran polutan dalam penelitian ini menggunakan metode interpolasi IDW (*Inverse Distance Weighted*) dengan input data konsentrasi polutan pada berbagai jarak *downwind*. Pramono (2008) menyatakan bahwa metode IDW adalah metode deterministik yang sederhana dengan mempertimbangkan titik disekitarnya. Asumsi dari metode ini adalah nilai interpolasi akan lebih mendekati data sampel yang dekat daripada yang jauh dan bobot akan berubah secara linear dengan jarak titik dengan data sampel. Pemetaan sebaran debu, SO₂ dan NO_x hanya membatasi wilayah kecamatan yang dekat dengan sumber pencemar. Nilai output model Gauss yang dipetakan adalah nilai konsentrasi yang diskenariokan pada berbagai jarak *downwind*, yaitu pada jarak 50 m, 100 m, 200 m, 400 m, 800 m, 1600 m, 3200 m, 6400 m dan 12800 m dari sumber emisi serta didasarkan pada arah angin dominan. Pemetaan sebaran konsentrasi polutan yang bersumber menggunakan *software ArcView 10.3* dengan langkah sebagai berikut:

1. Interpolasi nilai konsentrasi permukaan polutan dalam peta.
2. *Overlay* peta hasil interpolasi, peta dasar dan batas administrasi sehingga diketahui wilayah penyebaran polutan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Konsentrasi Diurnal Debu (TSP), SO₂ dan NO_x

Konsentrasi diurnal debu, SO₂ dan NO_x dipengaruhi oleh kondisi stabilitas atmosfer karena terjadi perbedaan antara stabilitas atmosfer pada pagi, siang dan malam hari. Penelitian ini menggunakan klasifikasi stabilitas atmosfer Pasquill-Gifford yang didasari pada data kecepatan angin, radiasi matahari serta keawanan. Vallero (2008) menyebutkan klasifikasi Pasquill-Gifford kondisi atmosfer stabil (E dan F) cenderung terjadi saat malam hari saat tidak ada radiasi matahari, atmosfer netral terjadi saat keawanan tinggi serta kecepatan angin tinggi dan atmosfer tidak stabil terjadi pada pagi-sore hari

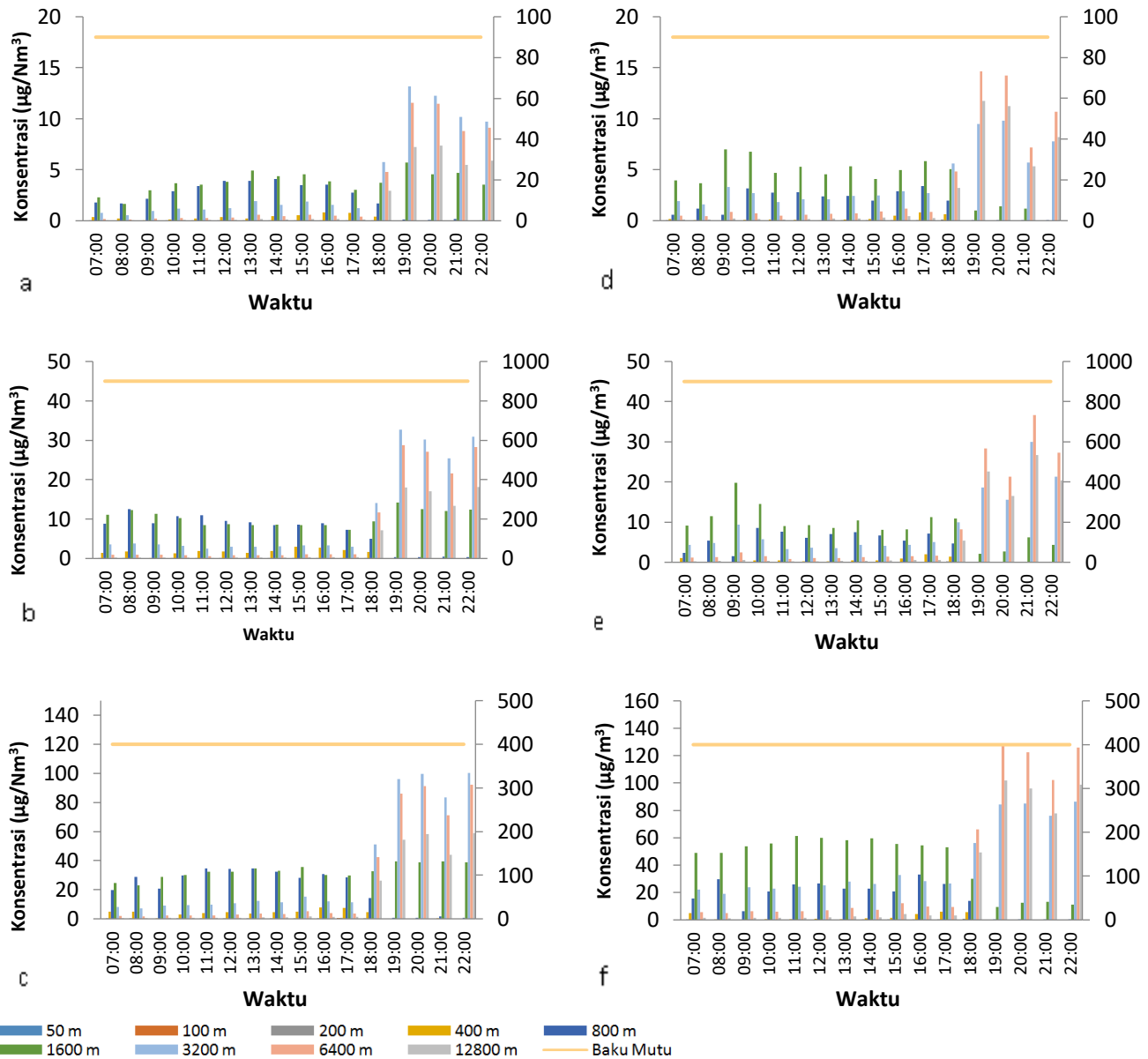
saat matahari masih bersinar. Perbedaan stabilitas atmosfer mempengaruhi ketinggian lapisan pencampuran (*mixing layer*) yang mempengaruhi konsentrasi pencemar di udara.

Gambar 1a, 1b dan 1c menunjukkan pola diurnal konsentrasi permukaan debu (TSP), SO₂, dan NO_x yang bersumber dari cerobong N1 dengan tinggi cerobong 66 meter berdasarkan output model dispersi Gauss pada berbagai skenario jarak *downwind*. Pola yang ditunjukkan hampir sama, dengan konsentrasi permukaan pencemar pada malam hari lebih tinggi dibandingkan dengan siang hari pada jarak *downwind* 3200 m dan 6400 m dari sumber pencemar (cerobong N1). Pola diurnal yang dianalisis dari pukul 07.00 WIB – 22.00 WIB mempertimbangkan data meteorologi yang tersedia di BMKG (Badan Meteorologi dan Geofisika) yang merupakan input model. Konsentrasi debu maksimum terjadi pada pukul 19.00 WIB dengan nilai 13.16 µg/Nm³ (3200 m dari cerobong N1). Konsentrasi SO₂ maksimum terjadi pada pukul 19.00 WIB dengan nilai 32.69 µg/Nm³ (3200 m dari cerobong N1), serta konsentrasi NO_x maksimum terjadi pada pukul 20.00 WIB dengan nilai 100.21 µg/Nm³ (3200 m dari cerobong N1).

Gambar 1d, 1e dan 1f menunjukkan pola diurnal konsentrasi permukaan (z=0) debu (TSP), SO₂ dan NO_x yang bersumber dari cerobong N2 dengan ketinggian cerobong 100.95 meter. Pola diurnal ketiga pencemar utama dari pabrik semen tersebut hampir sama, dengan konsentrasi permukaan maksimum jatuh pada jarak *downwind* 6400 meter dari sumber emisi. Pola konsentrasi permukaan diurnal menunjukkan bahwa konsentrasi polutan pada malam hari lebih tinggi dibandingkan pada siang hari atau dengan kata lain konsentrasi permukaan maksimum terjadi saat tidak ada radiasi matahari. Konsentrasi permukaan debu maksimum adalah 14.65 µg/Nm³ (jarak 6400 m dari cerobong N2) serta terjadi pada pukul 19.00 WIB. Konsentrasi SO₂ permukaan maksimum terjadi pada pukul 21.00 WIB dengan nilai konsentrasi 36.65 µg/Nm³ pada jarak 6400 m dari sumber emisi, serta konsentrasi permukaan maksimum untuk polutan NO_x juga terjadi pada jarak 6400 m dari sumber emisi dengan nilai 128.10 µg/Nm³ yang terjadi pada pukul 19.00 WIB. Konsentrasi

permukaan polutan yang bersumber dari cerobong N2 cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan cerobong N1 karena polutan yang diemisikan oleh cerobong N2 lebih besar dibandingkan dengan cerobong N1 namun

nilai konsentrasi tersebut masih berada dibawah baku mutu udara ambien berdasarkan PP No. 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.



Gambar 1. Pola diurnal konsentrasi polutan dari cerobong N1 dan N2 (a : debu_N1; b: SO₂_N1; c: NO_x_N1; d: debu_N2; e: SO₂_N2; f: NO_x_N2)

Konsentrasi permukaan debu, SO₂ dan NO_x pada malam hari cenderung lebih tinggi daripada siang hari (saat ada radiasi matahari) karena saat malam hari ketinggian *mixing layer* (lapisan pencampuran) lebih rendah daripada siang hari. Ketinggian lapisan pencampuran berkaitan dengan kondisi stabilitas atmosfer. Hasil analisis data menunjukkan bahwa pada kondisi stabilitas tidak stabil yang cenderung terjadi pada pagi-sore hari ketinggian lapisan pencampuran lebih tinggi dibandingkan pada saat kondisi stabil (malam

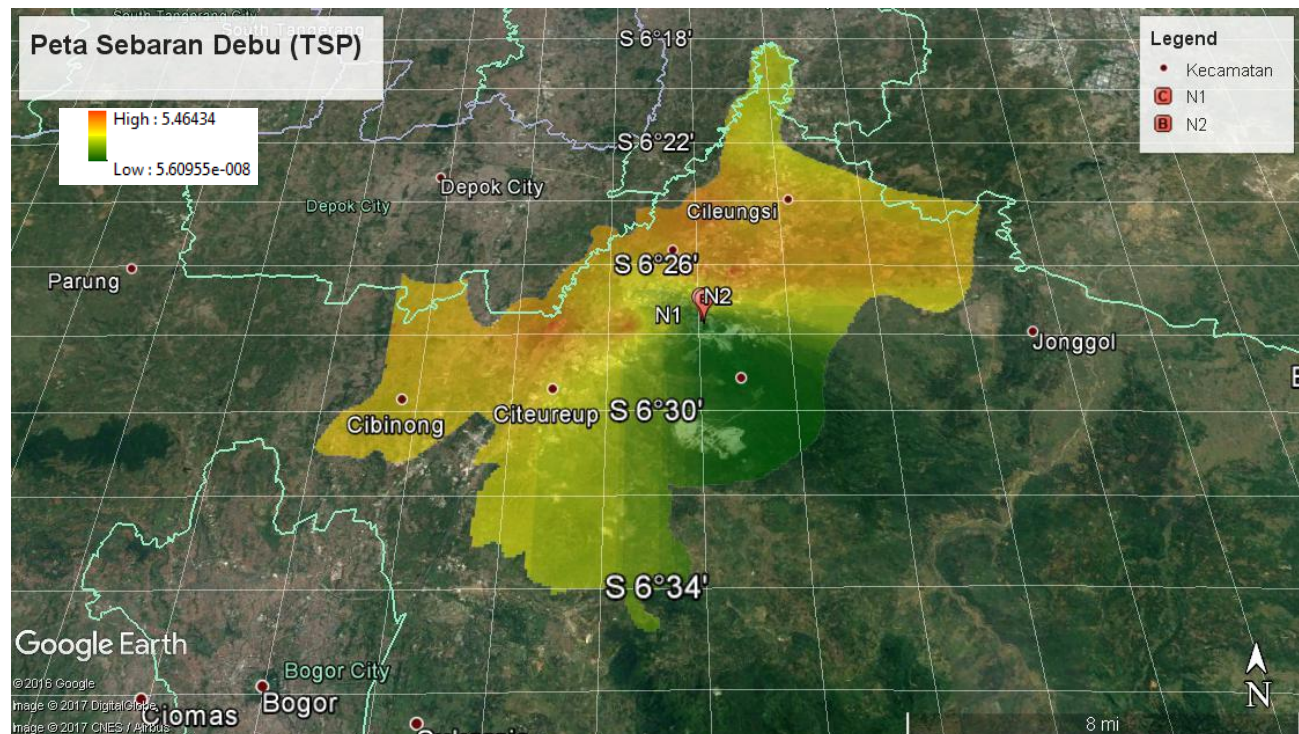
hari). *Mixing height* pada kondisi atmosfer tidak stabil berkisar antara 119 – 238 meter, sedangkan pada kondisi atmosfer stabil *mixing height* berkisar antara 74 – 106 meter. Lazaridis (2011) menyatakan bahwa karakteristik utama dari *mixing layer* adalah adanya fluks turbulen yang terjadi akibat momentum dan pemanasan permukaan bumi dan pancaran radiasi dari bagian bawah awan. Lapisan pencampuran terbentuk selama hari tanpa awan karena pemanasan permukaan bumi akibat radiasi matahari sekitar 30 menit – 1 jam setelah matahari terbit.

Lapisan ini ditandai dengan adanya pencampuran massa udara yang intensif pada kondisi tidak stabil karena adanya pergerakan massa udara hangat sehingga tinggi maksimum lapisan pencampuran akan terjadi setelah tengah hari saat suhu udara maksimum sehingga polutan (debu, SO_2 dan NO_x) akan mengalami pengenceran akibat pencampuran polutan dengan massa udara yang belum tercemar dengan volume yang lebih besar sehingga konsentrasi polutan lebih rendah. Kondisi atmosfer stabil yang dominan terjadi pada malam hari menyebabkan terjadinya lapisan inversi yang mengakibatkan massa udara hangat tidak dapat naik dan ketinggian lapisan pencampuran menurun. Akibat dari fenomena ini adalah polutan debu, SO_2 dan NO_x terjebak dan mengalami pencampuran dengan massa udara dengan volume pencampuran yang lebih kecil sehingga konsentrasinya lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi *mixing height* yang lebih tinggi. Hasil penelitian Eliasson *et al.* (2009) memperlihatkan fenomena yang sama, yaitu

konsentrasi partikel ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} dan TSP) memiliki konsentrasi maksimum pada pagi dan malam hari di wilayah daratan Afrika. Penelitian Turyanti (2016) juga menunjukkan hasil yang sama, yaitu konsentrasi PM_{10} meningkat pada malam hingga pagi hari dan menurun pada siang hingga sore hari.

3.2. Lokasi Sebaran Debu, SO_2 dan NO_x

Analisis lokasi sebaran debu, SO_2 dan NO_x yang bersumber dari industri bermanfaat untuk menentukan langkah pengelolaan pencemaran udara yang tepat dan efektif. Lokasi sebaran polutan debu, SO_2 dan NO_x yang bersumber dari cerobong pembakaran N1 dan N2 yang menyebar berdasarkan arah angin dominan yang cenderung bergerak ke wilayah Cileungsi, Citereup, Gunung Putri, Klapanunggal dan Cibinong. Lokasi – lokasi sebaran ini bisa dijadikan acuan dalam melakukan pemantauan kualitas udara ambien.



Gambar 2. Wilayah sebaran debu rata-rata dengan sumber emisi cerobong N1 dan N2

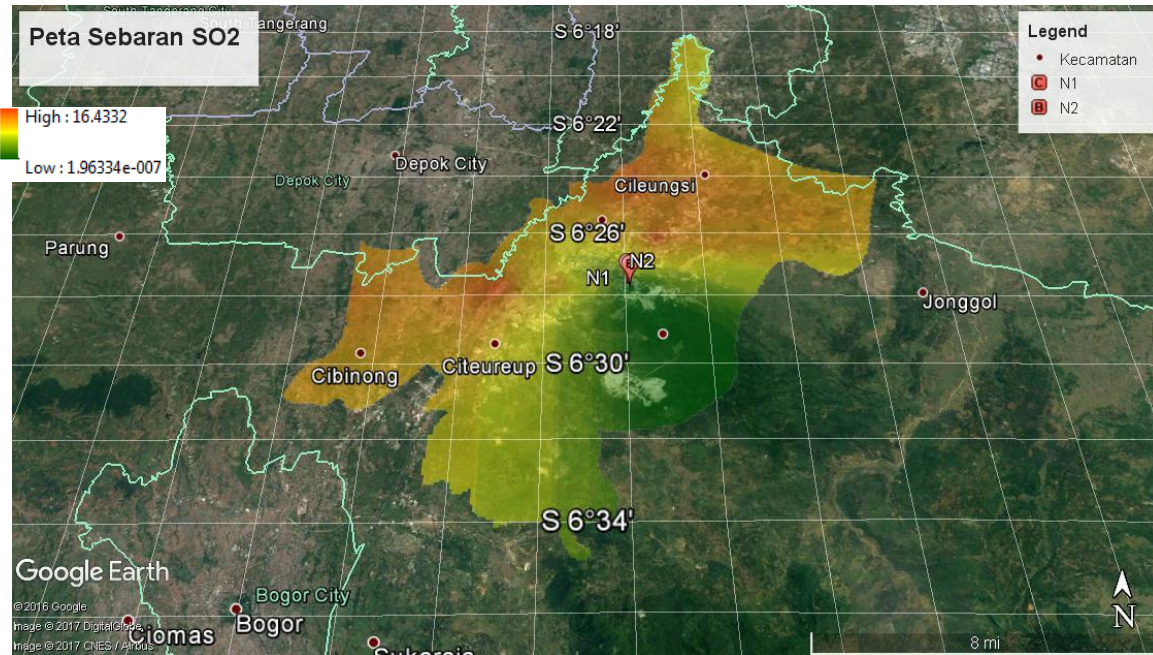
Gambar 2, 3 dan 4 merupakan peta sebaran debu, SO_2 dan NO_x dengan nilai konsentrasi permukaan yang tinggi (merah) dominan terjadi di daerah Gunung Putri, Cileungsi dan sebagian wilayah Klapanunggal. Nilai konsentrasi debu, SO_2 dan NO_x di wilayah penyebaran polutan merupakan rata-rata konsentrasi polutan pada stabilitas A-F.

Tabel 5 menunjukkan perbandingan hasil pengukuran udara ambien yang dilakukan oleh industri dengan output model Gauss pada tujuh lokasi sampling. Konsentrasi debu dan SO_2 hasil pengukuran cenderung

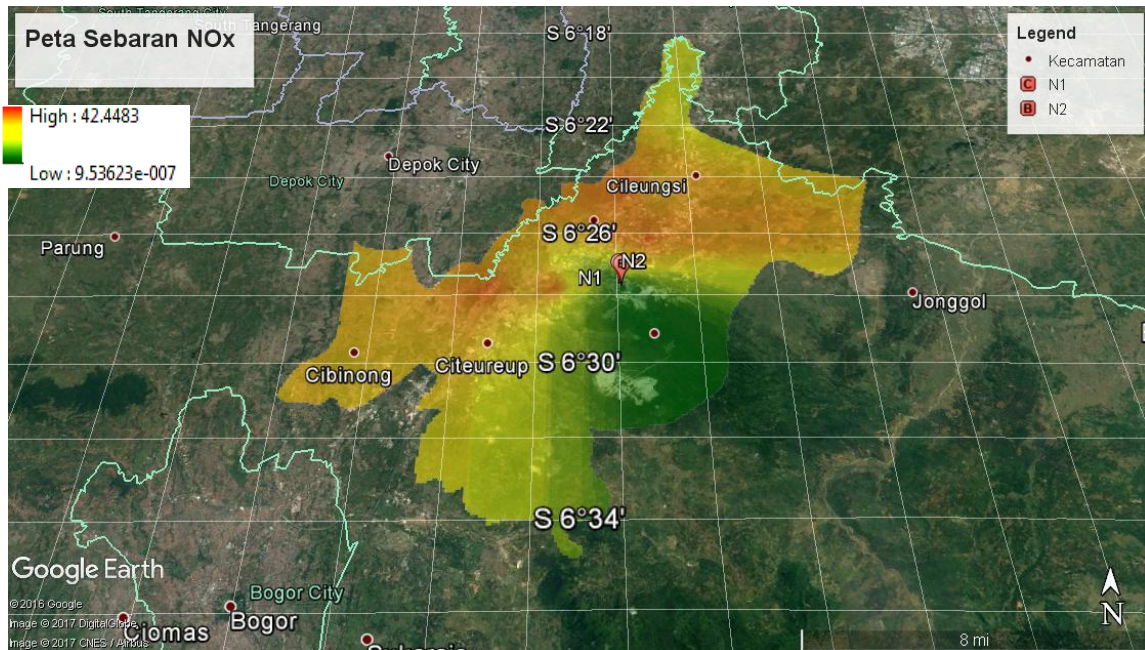
lebih besar dibandingkan dengan hasil model. Hal ini dikarenakan dalam model Gauss emisi dari sumber lain tidak diperhitungkan, sedangkan industri lain serta emisi dari transportasi menyumbangkan emisi di udara yang terukur saat pengambilan sampling udara ambien. Phinney *et al.* (2006) dalam Gibson *et al.* (2013), menyatakan bahwa perbedaan yang besar antara hasil observasi dengan hasil model disebabkan oleh adanya emisi dari kendaraan di jalan sekitar lokasi observasi. Hasil pengukuran NO_2 ada yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil model. Seinfeld dan Pandis

(2006) menyatakan bahwa NO_x terbentuk dari senyawa NO (nitrogen monoksida) dan NO_2 (nitrogen dioksida) sehingga konsentrasi NO_2 cenderung lebih kecil daripada NO_x . Turyanti dan Santikayasa (2006) juga

menyatakan hal yang sama bahwa NO_2 merupakan bagian dari pembentuk NO_x , sedangkan untuk pola penyebaran NO_2 hampir sama dengan NO_x .



Gambar 3. Wilayah sebaran SO_2 rata-rata-rata dengan sumber emisi cerobong N1 dan N2



Gambar 4. Wilayah sebaran NO_x rata-rata-rata dengan sumber emisi cerobong N1 dan N2

Tabel 5. Perbandingan konsentrasi debu (TSP), SO₂ dan NO_x hasil pengukuran ambien dengan model Gauss

Titik Sampling Ambien	Konsentrasi (µg/Nm ³)								
	Aktual			Model (N1)			Model (N2)		
	TSP	SO ₂	NO ₂	TSP	SO ₂	NO _x	TSP	SO ₂	NO _x
1	60.30	33.15	13.88	1.02	9.21	18.24	4.45	15.52	31.65
2	51.03	23.04	17.16	0.99	8.93	17.79	4.01	13.67	29.02
3	62.49	38.63	9.91	0.58	4.84	10.36	2.42	6.93	18.72
4	72.04	46.22	11.19	1.19	11.16	21.47	5.64	20.26	38.71
5	105.34	36.01	29.95	1.02	9.21	18.24	4.45	15.52	31.65
6	102.22	54.40	14.07	1.59	15.58	29.64	7.16	26.83	48.43
7	23.54	66.38	10.95	1.53	15.26	29.10	4.22	15.91	30.77

3.3. Jarak dan Konsentrasi Maksimum Permukaan Debu (TSP), SO₂ dan NO_x

Penentuan konsentrasi permukaan maksimum (*Maximum Ground Level Concentration (C_{max})*) debu, SO₂ dan NO_x serta jarak (X_{max}) atau lokasi terjadinya C_{max} dengan sumber emisi seperti cerobong industri penting dilakukan karena standar kualitas udara serta peraturan tentang pencemaran udara biasanya mengacu

pada konsentrasi permukaan maksimum (Arya 1999). Menurut Apiratikul (2015), C_{max} dan X_{max} merepresentasikan kondisi dan lokasi terjadinya kondisi terburuk yang disebabkan oleh polutan yang diemisikan oleh cerobong industri. *Screen3* merupakan salah satu model yang dikembangkan oleh US-EPA untuk memprediksi C_{max} dan X_{max} dari sumber emisi. Model ini mempunyai model dasar *Gaussian Model*.

Tabel 6. Jarak maksimum (X_{max}) dan konsentrasi maksimum (C_{max}) pada berbagai stabilitas atmosfer.

Stabilitas	X _{max} (meter)		Konsentrasi (µg/Nm ³) (N1)			Konsentrasi (µg/Nm ³) (N2)		
	N1	N2	Debu	SO ₂	NO _x	Debu	SO ₂	NO _x
Tidak Stabil	370-972	556-1517	3.05-8.49	9.8-42.18	42.99-69.39	6.42-12.78	13.48-39.27	58.39-88.78
Netral	987-1237	1023-2155	5.85-6.61	9.8-10.68	52.15-63.77	5.56-23.08	4.28-14.22	97-117/29
Stabil	1845-2927	2908-4880	2-12.21	2.06-59.25	34.08-103.82	5.5-15.68	14.21-127.72	51.18-133.07

Tabel 6 menunjukkan bahwa jarak konsentrasi maksimum debu, SO₂ dan NO_x permukaan dari cerobong N1 dan N2 semakin jauh dengan adanya peningkatan kestabilan atmosfer. Arya (1999) menyebutkan bahwa saat kondisi atmosfer tidak stabil ada *eddy diffusion* yang mengakibatkan polutan bergerak secara vertikal dan dalam waktu yang singkat pergerakan polutan ke bawah menyebabkan konsentrasi maksimum jatuh pada jarak yang relatif dekat dengan sumber emisi. Peningkatan

kestabilan atmosfer mengakibatkan polutan terperangkap dan cenderung bergerak secara horizontal yang mengakibatkan konsentrasi maksimum polutan terjadi semakin jauh dari sumber pencemar. Penelitian Apiratikul (2015) menunjukkan hasil yang sama, yaitu semakin stabil kondisi atmosfer maka jarak terjadinya konsentrasi maksimum permukaan polutan semakin jauh dari sumber pencemar.

Tabel 7. Nilai korelasi antara kecepatan angin dengan X_{max} dan C_{max} pada berbagai stabilitas atmosfer

Stabilitas	Cerobong N1				Cerobong N2			
	X _{max}	Debu	SO ₂	NO _x	X _{max}	Debu	SO ₂	NO _x
A-B	-0.96	-0.85	1.00	-0.83	-0.99	-0.85	1.00	-0.83
B	-0.82	-0.34	-0.83	0.01	-0.83	-0.34	-0.83	0.01
B-C	-1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00
C	-0.98	-1.00	0.99	0.70	-0.94	-1.00	0.99	0.70
D	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00
E	-0.95	-0.90	-1.00	-0.85	-0.98	-0.90	-1.00	-0.85
F	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00

Kecepatan angin mempunyai dua pengaruh, yaitu peningkatan *bouyancy* atau momentum; pengenceran dan kepulan dari cerobong industri. Kecepatan angin yang mengakibatkan terjadinya konsentrasi polutan tertinggi dari sumber pencemar pada suatu stabilitas atmosfer tertentu disebut *critical wind speed* (Turner 1994). Hasil analisis data yang ditampilkan pada Tabel 7 menunjukkan bahwa kecepatan angin dan jarak terjadinya konsentrasi maksimum permukaan memiliki korelasi kuat negatif pada semua stabilitas atmosfer yang artinya peningkatan kecepatan angin akan mengakibatkan semakin dekat terjadinya konsentrasi maksimum permukaan polutan dari sumber pencemar. Vallero (2008) memperlihatkan bahwa input faktor meteorologi dimasukkan dalam formula untuk menghitung X_{max} adalah kecepatan angin dan berbanding terbalik dengan X_{max} . Fenomena ini terjadi karena dengan adanya peningkatan kecepatan angin menyebabkan terjadinya peningkatan turbulensi yang menyebabkan polutan bergerak secara vertikal sehingga saat pergerakan turun, polutan dengan konsentrasi maksimum jatuh pada jarak yang dekat dengan sumber pencemar.

Hubungan antara konsentrasi debu, SO_2 dan NO_x dengan kecepatan angin terlihat pola yang tidak teratur karena pola kecepatan angin lebih berkaitan dengan jangkauan terjadinya pencemaran udara. Hal yang sama juga dikemukakan oleh Berlyand (1991), penelitiannya menemukan bahwa korelasi antara kecepatan angin dan konsentrasi debu hanya -0.38. Turyanti (2016) menyebutkan bahwa kecepatan angin akan menentukan seberapa jauh pencemar akan terbawa sepanjang arah angin dominan.

3.4. Rekomendasi Pemantauan dan Pengendalian Pencemaran Udara

Pengendalian pencemaran udara adalah upaya pencegahan dan/atau penanggulangan pencemaran udara serta pemulihan mutu udara yang meliputi pengendalian usaha dan/atau kegiatan sumber bergerak, sumber bergerak spesifik, sumber tidak bergerak, dan sumber tidak bergerak spesifik yang dilakukan dengan upaya pengendalian emisi dan/atau sumber gangguan yang bertujuan untuk mencegah turunnya mutu udara ambien (PP No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara). Pemantauan kualitas udara terdiri dari dua hal, yaitu pemantauan faktor dan proses emisi dan pemantauan kualitas udara ambien untuk menentukan langkah pengelolaan pencemaran udara yang tepat (UNEP 2005). Output model dispersi Gauss menunjukkan bahwa konsentrasi permukaan polutan tertinggi terjadi saat kondisi atmosfer stabil (E dan F) yang cenderung terjadi saat malam hari ketika tidak ada radiasi matahari dan kondisi angin lemah (*calm*) atau tidak ada angin. Konsentrasi permukaan debu, SO_2 dan NO_x bisa mencapai dua kali lipat dibandingkan kondisi

tersebut, sehingga pemantauan kualitas udara harus lebih intensif saat kondisi atmosfer stabil untuk menanggulangi dampak terburuk dari pencemaran udara yang bersumber dari cerobong industri.

Lokasi terjadinya konsentrasi polutan maksimum bisa dijadikan acuan dalam melaksanakan pemantauan kualitas udara baik pada kondisi atmosfer tidak stabil, netral, maupun stabil. Lokasi dengan paparan debu, SO_2 dan NO_x yang tinggi cenderung terjadi di daerah Gunung Putri, Cileungsi dan Klapa Nunggal. Selain itu jika didasarkan pada jarak terjadinya konsentrasi maksimum, pemantauan kualitas udara sebaiknya dilakukan pada jarak 370 meter – 2927 meter dari cerobong N1 dan 556 meter – 4880 meter dari cerobong N2.

Faktor meteorologi yang mempengaruhi pola dispersi polutan tidak dapat dikendalikan tapi merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam perumusan langkah pemantauan dan pengendalian pencemaran udara, sehingga faktor yang bisa dikendalikan adalah faktor emisi dari sumber pencemar. Industri semen yang merupakan obyek penelitian ini memiliki pengelolaan pencemaran udara yang sudah bagus dengan konsentrasi emisi debu, SO_2 dan NO_x berada dibawah baku mutu emisi sumber tidak bergerak, selain itu di cerobong telah terpasang alat pengendali emisi electrostatic precipitator. Namun, jika perusahaan atau pemerintah ingin melakukan pengendalian pencemaran udara berdasarkan kondisi meteorologi bisa dilakukan dengan membatasi/mengurangi kegiatan pembakaran pada cerobong industri saat kondisi atmosfer stabil (E dan F) yang biasanya terjadi pada malam hari sampai matahari terbit untuk mengurangi konsentrasi polutan yang masuk ke udara ambien. Langkah lain yang bisa dilakukan oleh perusahaan dalam upaya mengurangi konsentrasi permukaan polutan adalah menambah ketinggian cerobong sampai batas konsentrasi yang diinginkan.

Tabel 8 memperlihatkan bahwa penurunan konsentrasi permukaan tertinggi terjadi saat tinggi cerobong diubah menjadi 116 meter. Penurunan konsentrasi permukaan polutan mencapai 57% saat kondisi stabil sehingga bisa mengurangi dampak terburuk saat kondisi ini karena saat kondisi atmosfer stabil, konsentrasi permukaan bisa mencapai lebih dari dua kali lipat dari kondisi atmosfer yang lain. Keputusan untuk menambah ketinggian cerobong tentu harus mempertimbangkan karakteristik sumber pencemar (cerobong industri) seperti diameter cerobong, debit emisi serta konsentrasi polutan yang diemisikan cerobong. Peningkatan ketinggian cerobong akan mengakibatkan volume pencampuran polutan dengan udara ambien yang lebih besar sehingga konsentrasi polutan yang sampai di permukaan (*ground*) lebih rendah dibandingkan dengan cerobong yang lebih rendah. Vallero (2008) menyatakan bahwa *stakeholder* bisa menggunakan model matematika atau teknik statistik dalam merumuskan pengendalian pencemaran udara seperti lokasi dan karakteristik sumber emisi untuk meningkatkan kualitas udara di masa depan.

Peningkatan tinggi cerobong sebaiknya memperhatikan ketinggian lapisan inversi. Jika kondisi atmosfer semakin stabil, maka lapisan inversi akan semakin tinggi. Peningkatan pembangunan gedung serta

permukiman di sekitar permukiman juga akan meningkatkan lapisan inversi, sehingga semakin tinggi peningkatan cerobong yang diperlukan.

Tabel 8. Penurunan konsentrasi polutan dengan skenario peningkatan tinggi cerobong pada berbagai kondisi stabilitas atmosfer

Tinggi Cerobong	Tidak Stabil			Netral			Stabil		
	% Penurunan			% Penurunan			% Penurunan		
	Debu	SO ₂	NO _x	Debu	SO ₂	NO _x	Debu	SO ₂	NO _x
66	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	8	8	8	8	8	8	17	17	17
86	15	16	15	16	16	16	30	30	30
96	21	22	21	23	23	23	41	41	41
106	27	28	27	29	29	29	50	50	50
116	32	34	32	35	35	35	57	57	57

4. Kesimpulan

Faktor meteorologi mempengaruhi pola dispersi debu (TSP), SO₂ dan NO_x di udara serta merupakan faktor yang penting dijadikan pertimbangan dalam merumuskan upaya pemantauan dan pengendalian pencemaran udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi permukaan debu, SO₂ dan NO_x tertinggi terjadi pada malam hari (7-10PM), saat kondisi atmosfer stabil. Jarak maksimum (X_{max}) terjadinya konsentrasi maksimum di permukaan (X_{max}) debu, SO₂, dan NO_x akan semakin jauh dari sumber pencemar seiring dengan meningkatnya tingkat kestabilan atmosfer. Nilai X_{max} mempunyai korelasi negatif kuat ($-0.82 \leq r \leq -1$) dengan kecepatan angin. Pemantauan kualitas udara sebaiknya dilakukan lebih intensif saat malam hari dan alat pemantauan diletakkan di lokasi terjadinya konsentrasi maksimum. Peningkatan ketinggian cerobong merupakan salah satu upaya pengendalian pencemaran udara yang bisa dilakukan untuk mengurangi konsentrasi pencemar. Selain itu bisa dilakukan pembatasan proses pembakaran saat malam hari (kondisi atmosfer stabil) mempertimbangkan konsentrasi maksimum terjadi pada malam hari. Konsentrasi permukaan polutan bisa turun 57% saat tinggi cerobong dinaikan sebesar 50 meter saat kondisi atmosfer stabil.

5. Ucapan Terimakasih

Terimakasih penulis ucapkan kepada Badan Meteorologi dan Geofisika Kelas I Dramaga dan industri semen di Bogor atas dukungan data-data emisi dan meteorologi yang diperlukan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

[1] Apiratikul, R., 2015. Approximation formula for the prediction of downwind distance that found the maximum ground level concentration of air pollution based on the gaussian model. *Jurnal Procedia Social and Behavioral Sciences* 197, pp. 1257-1262.

[2] Arya, S.P., 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press, New York.

[3] Berlyand, M.E., 1991. *Prediction and Regulation of Air Pollution*. Springer-Science+Business Media, B.V, Netherland.

[4] Eliasson, I., Jonson, P., Holmer, B., 2009. Diurnal and intra-urban particle concentrations in relation to windspeed and stability during the dry season in three African cities. *Environ Monit Assess* 154, pp. 309-324.

[5] [EPA] Environmental Protection Agency, 1995. *Industri Source Complex-3 (ISC3) Dispersion Model, Volume 1 dan 2: User Instruction*. US Environmental Protection Agency (EPA) Publication, North Carolina (US).

[6] Gibson, M.D., Kundu, S., Satish, M., 2013. Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂ from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model. *Jurnal Atmospheric Pollution Research* 4, pp.157-167.

[7] Holcim, 2015. *Laporan Pembangunan Berkelanjutan 2015*. Holcim Indonesia, Jakarta.

[8] Iodice, P., Senatore, A., 2015. Air pollution and air quality state in an Italian National Interest Priority Site. Part 2: the pollutant dispersion. *Jurnal Energy Procedia* 81, pp. 637-643.

[9] [Kemenperin] Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2016. Target pertumbuhan industri 5,7 persen. [terhubung berkala]. <http://www.kemenperin.go.id/artikel/13740/Tahun-2016,-Target-Pertumbuhan-Industri-5,7-Persen> [26 Agustus 2016].

[10] [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2014. *Indeks Kualitas Lingkungan Hidup Indonesia 2014*. KLHK, Jakarta.

[11] Lazaridis, M., 2011. *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Springer, London.

[12] Pramono, G.H., 2008. Akurasi metode IDW dan Kringing untuk interpolasi sebaran sedimen tersuspensi. *Forum Geografi* 22(1), pp. 97-110.

[13] Rahmawati, F., 2003. *Aplikasi model dispersi gauss untuk menduga pencemaran udara di kawasan industri*. Tesis. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

[14] Ruhiat, Bey, A., Santosa, I., Nelwan, L.O., 2008. Penyebaran pencemar udara di kawasan industri cilegon. *Jurnal Agromet Indonesia* 22(1), pp. 1-11.

[15] Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change: Second Edition*. A Wiley-Interscience Publication, Canada.

[16] Shaohui, Z., Worrell, E., Graus, W.C., 2015. Cutting air pollution by improving energy efficiency of China's cement industry. *Jurnal Energy Procedia* 83, pp. 10-20.

[17] Skelsey, P., Holtslag, A.A.M., Werf, W., 2008. Development and validation of a quasi-Gaussian plume model for the transport of botanical spores. *Jurnal Agricultural and Forest Meteorology* 148, pp. 1383-1394.

- [18] Spijkerboer, H.P., Beniers, J.E., Jaspers, D., Schouten, H.J., Goudriaan, J., Rabbinge, R., Werf, W., 2002. Ability of the gaussian plume model to predict and describe spore dispersal over a potato crop. *Jurnal Ecological Modelling* 155, pp. 1-18.
- [19] Turner, D.B., 1994. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling: Second Edition*. Lewis Publishers, US.
- [20] Turyanti, A., 2016. Pemodelan dispersi PM_{10} dan SO_2 dengan pendekatan dinamika stabilitas atmosfer di lapisan perbatas pada kawasan industri. Disertasi. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- [21] Turyanti A, Santikayasa IP. 2006. Analisis pola unsur meteorologi dan konsentrasi polutan di udara ambien studi kasus: Jakarta dan Bandung. *J Agromet Indonesia* 20(2), pp. 25-37.
- [22] [UNEP] United Nation Environment Programme, 2005. *Urban Air Quality Management Tool Book*. United Nation Environment Programme.[terhubung berkala]. http://www.unep.org/urban_environment/PDFs/handbook.pdf [23 Januari 2017].
- [23] Vallero, D.A., 2008. *Foundamental of Air Pollution: Fourth Edition*. Academic Press, California